

ANALISIS KESULITAN KONSEPTUAL PESERTA DIDIK PADA MATERI ENZIM DAN REAKSI METABOLISME

Siti Hanisah Matni Br Tarigan¹, Miftahul Khairan² Lastri Kusuma Daulay³, Ririn Cahyani⁴, Khairani⁵

Universitas Islam Negeri Sumatera Utara

¹nisatarigan2018m@gmail.com ²miftahulkhairani92@gmail.com

³lastrikusuma30@gmail.com ⁴rincha141@gmail.com ⁵raniilorongsastra423@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis kesulitan konseptual yang dialami peserta didik dalam memahami materi enzim dan reaksi metabolisme pada pembelajaran biologi di tingkat Sekolah Menengah Atas (SMA). Materi enzim dan metabolisme merupakan salah satu topik yang paling abstrak dan kompleks dalam biologi, sehingga seringkali menimbulkan miskonsepsi dan hambatan belajar yang signifikan. Metode penelitian yang digunakan adalah penelitian deskriptif kualitatif dengan pendekatan studi kasus. Subjek penelitian melibatkan 120 peserta didik kelas XII IPA dari tiga sekolah menengah atas di Kota Medan. Instrumen pengumpulan data meliputi tes diagnostik berbasis pilihan ganda beralasan (two-tier multiple choice), wawancara semi-terstruktur, dan lembar observasi pembelajaran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat tujuh kategori utama kesulitan konseptual, yaitu: (1) kesulitan memahami sifat dan mekanisme kerja enzim sebagai biokatalis; (2) kerancuan antara konsep substrat dan produk reaksi; (3) kesalahpahaman tentang faktor-faktor yang mempengaruhi aktivitas enzim; (4) ketidakmampuan menghubungkan antara reaksi katabolisme dan anabolisme; (5) miskonsepsi pada jalur glikolisis dan siklus Krebs; (6) kesulitan memahami rantai transport elektron dan kemiosmosis; serta (7) ketidakmampuan mengintegrasikan konsep enzim dengan proses metabolisme secara holistik. Persentase peserta didik yang mengalami miskonsepsi berkisar antara 38,5% hingga 72,3% bergantung pada subkonsep yang diuji. Faktor penyebab utama meliputi abstraksi materi yang tinggi, kurangnya representasi visual yang memadai, serta strategi pembelajaran yang belum optimal. Implikasi penelitian ini memberikan rekomendasi bagi pendidik untuk mengembangkan pendekatan pembelajaran berbasis analogi, visualisasi tiga dimensi, dan pembelajaran kontekstual guna mereduksi miskonsepsi peserta didik.

Kata Kunci: kesulitan konseptual, enzim, metabolisme, miskonsepsi, peserta didik

ABSTRACT

This study aims to identify and analyze conceptual difficulties experienced by students in understanding enzyme and metabolic reaction material in biology learning at the Senior High School (SMA) level. Enzyme and metabolism material is one of the most abstract and complex topics in biology, often leading to significant misconceptions and learning obstacles. The research method used is descriptive qualitative research with a case study approach. Research subjects involved 120 students of class XII Science from three senior high schools in Medan City. Data collection instruments included a reasoning-based multiple choice diagnostic test (two-tier multiple choice), semi-structured interviews, and learning observation sheets. The results showed that there were seven main categories of conceptual difficulties: (1) difficulty understanding

the nature and mechanism of enzymes as biocatalysts; (2) confusion between the concepts of substrate and reaction products; (3) misunderstanding about factors affecting enzyme activity; (4) inability to connect catabolism and anabolism reactions; (5) misconceptions in glycolysis pathways and the Krebs cycle; (6) difficulty understanding the electron transport chain and chemiosmosis; and (7) inability to integrate enzyme concepts with metabolic processes holistically. The percentage of students experiencing misconceptions ranged from 38.5% to 72.3% depending on the subconcept tested. The main causative factors include high material abstraction, lack of adequate visual representation, and suboptimal learning strategies. The implications of this research provide recommendations for educators to develop analogy-based learning approaches, three-dimensional visualization, and contextual learning to reduce student misconceptions.

Keywords: conceptual difficulties, enzyme, metabolism, misconceptions, students

A. PENDAHULUAN

Biologi sebagai ilmu yang mempelajari kehidupan memiliki cakupan konsep yang sangat luas dan bersifat multidimensional. Di antara sekian banyak topik dalam pembelajaran biologi tingkat sekolah menengah atas, materi enzim dan reaksi metabolisme menempati posisi yang sangat krusial namun sekaligus menjadi salah satu topik paling menantang bagi peserta didik (Tekkaya, 2002). Hal ini disebabkan oleh sifat materi yang sangat abstrak, melibatkan proses-proses yang terjadi pada tingkat molekular yang tidak dapat diamati secara langsung, serta membutuhkan kemampuan berpikir integratif yang tinggi untuk menghubungkan berbagai konsep yang saling berkaitan.

Kesulitan konseptual dalam pembelajaran biologi bukanlah fenomena baru. Berbagai penelitian telah mengidentifikasi bahwa peserta didik seringkali membawa konsep awal (prior knowledge) yang keliru atau tidak lengkap ke dalam proses pembelajaran, yang kemudian berkembang menjadi miskonsepsi yang resisten terhadap perubahan (Wandersee, Mintzes & Novak, 1994). Miskonsepsi yang tidak teridentifikasi dan tidak tertangani dengan tepat dapat menghambat perkembangan pemahaman konseptual peserta didik secara signifikan, bahkan dalam jangka panjang dapat mempengaruhi kemampuan mereka dalam mengintegrasikan pengetahuan baru yang lebih kompleks (Chi, 2008).

Materi enzim secara spesifik mencakup pemahaman tentang struktur dan sifat enzim sebagai protein biokatalis, mekanisme kerja enzim meliputi teori kunci-gembok (lock and key) dan induced fit, faktor-faktor yang mempengaruhi aktivitas enzim seperti suhu, pH, konsentrasi substrat, dan inhibitor, serta peran enzim dalam berbagai jalur metabolisme. Kompleksitas ini diperparah dengan fakta bahwa pemahaman tentang enzim merupakan prasyarat esensial untuk memahami proses metabolisme yang lebih luas, termasuk katabolisme (respirasi seluler) dan anabolisme (fotosintesis) (Klymkowsky & Garvin-Doxas, 2008).

Reaksi metabolisme sebagai kelanjutan dari konsep enzim melibatkan pemahaman tentang jalur-jalur biokimia yang sangat kompleks. Glikolisis, siklus asam sitrat (siklus Krebs), rantai transpor elektron, dan kemiosmosis dalam respirasi seluler, serta reaksi terang dan siklus Calvin dalam fotosintesis, semuanya merupakan rangkaian proses yang memerlukan pemahaman mendalam tentang perubahan energi, transfer elektron, dan pembentukan molekul-molekul kunci seperti ATP, NADH, dan FADH₂ (Nelson & Cox, 2017).

Penelitian-penelitian terdahulu telah mengungkap berbagai bentuk miskonsepsi yang umum terjadi pada materi ini. Dikmenli (2010) menemukan bahwa lebih dari 60% mahasiswa biologi mengalami miskonsepsi tentang mekanisme kerja enzim. Anderson et al. (2002) mengidentifikasi bahwa peserta didik seringkali menganggap enzim sebagai reaktan yang habis dikonsumsi dalam reaksi, bukan sebagai katalis yang dapat digunakan kembali. Sementara itu, Songer & Mintzes (1994) melaporkan bahwa miskonsepsi tentang respirasi seluler sangat prevalent, di mana peserta didik cenderung menyamakan respirasi seluler dengan pernapasan (breathing) pada organisme.

Identifikasi kesulitan konseptual yang tepat dan komprehensif merupakan langkah pertama yang krusial dalam upaya perbaikan pembelajaran. Tanpa pemahaman yang mendalam tentang di mana dan mengapa peserta didik mengalami kesulitan, intervensi pedagogis yang dilakukan oleh pendidik berisiko menjadi tidak tepat sasaran. Oleh karena itu, penelitian yang secara sistematis memetakan kesulitan konseptual peserta didik dalam materi enzim dan metabolisme sangat dibutuhkan, khususnya dalam konteks pendidikan Indonesia yang memiliki karakteristik kurikulum dan budaya belajar yang unik.

Penelitian ini dilakukan dengan mempertimbangkan konteks spesifik pembelajaran biologi di Kota Medan, Sumatera Utara. Karakteristik sosio-kultural, ketersediaan sumber belajar, dan pendekatan pedagogis yang dominan digunakan di sekolah-sekolah menengah atas di wilayah ini menjadi faktor-faktor kontekstual yang turut mempengaruhi proses dan hasil belajar peserta didik. Dengan demikian, temuan penelitian ini diharapkan tidak hanya memiliki relevansi akademis secara umum, tetapi juga memberikan kontribusi praktis yang kontekstual bagi para pendidik di wilayah Sumatera Utara khususnya.

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, penelitian ini dirumuskan dengan tujuan untuk: (1) mengidentifikasi jenis-jenis kesulitan konseptual yang dialami peserta didik SMA pada materi enzim dan reaksi metabolisme; (2) menganalisis tingkat prevalensi miskonsepsi pada masing-masing subkonsep; (3) mengidentifikasi faktor-faktor yang melatarbelakangi terjadinya kesulitan konseptual; dan (4) merumuskan rekomendasi pedagogis untuk mengatasi kesulitan konseptual tersebut.

B. KAJIAN TEORITIS

Konsep kesulitan belajar dalam domain pendidikan sains telah menjadi fokus penelitian selama beberapa dekade. Ausubel (1968) dalam teorinya tentang pembelajaran bermakna (*meaningful learning*) menegaskan bahwa pengetahuan awal yang dimiliki peserta didik merupakan faktor paling penting yang menentukan keberhasilan pembelajaran baru. Ketika pengetahuan awal tersebut tidak sesuai dengan konsep ilmiah yang diterima, maka terjadilah apa yang disebut sebagai miskonsepsi atau *alternative conception* (Driver et al., 1994).

Teori konstruktivisme yang dikemukakan oleh Piaget (1972) memberikan kerangka pemahaman yang komprehensif tentang bagaimana peserta didik membangun pengetahuan mereka. Menurut pandangan ini, peserta didik tidak pasif menerima informasi, melainkan secara aktif mengonstruksi pemahaman berdasarkan pengalaman dan skema kognitif yang telah dimiliki sebelumnya. Proses asimilasi dan akomodasi yang terjadi ketika menghadapi informasi baru dapat menghasilkan pemahaman yang tepat atau justru memperkuat miskonsepsi yang telah ada (Posner et al., 1982).

Dalam konteks biologi secara spesifik, Klymkowsky & Garvin-Doxas (2008) mengembangkan konsep "*hidden curriculum*" dalam biologi, yaitu sekumpulan konsep fundamental yang jarang diajarkan secara eksplisit namun menjadi prasyarat esensial untuk memahami berbagai topik biologi yang lebih kompleks. Konsep-konsep ini mencakup

pemahaman tentang struktur dan fungsi molekul, perubahan energi dalam sistem biologis, serta hubungan antara struktur dan fungsi pada berbagai tingkat organisasi kehidupan - yang semuanya sangat relevan dengan materi enzim dan metabolisme.

Enzim sebagai biokatalis merupakan konsep yang berada di persimpangan antara kimia dan biologi, sehingga memerlukan pemahaman interdisipliner yang kuat. Lehninger et al. (2017) mendefinisikan enzim sebagai molekul protein (atau RNA katalitik dalam beberapa kasus) yang mempercepat laju reaksi kimia dengan cara menurunkan energi aktivasi reaksi tanpa ikut dikonsumsi dalam proses tersebut. Pemahaman yang benar tentang sifat katalitik enzim ini merupakan fondasi yang krusial untuk memahami berbagai proses metabolisme yang terjadi dalam sel hidup.

Konsep metabolisme mencakup totalitas reaksi kimia yang terjadi dalam organisme hidup. Metabolisme dapat dibagi menjadi dua jalur utama yang saling berkaitan: katabolisme (pemecahan molekul kompleks menjadi molekul sederhana disertai pelepasan energi) dan anabolisme (sintesis molekul kompleks dari molekul sederhana yang memerlukan energi) (Berg et al., 2015). Respirasi seluler sebagai jalur katabolisme utama melibatkan serangkaian reaksi enzimatik yang sangat terkoordinasi, mulai dari glikolisis di sitoplasma, dekarboksilasi oksidatif, siklus Krebs, hingga fosforilasi oksidatif di mitokondria.

Penelitian tentang miskonsepsi dalam biologi telah mengidentifikasi berbagai faktor yang berkontribusi pada pembentukan dan persistensi miskonsepsi. Faktor-faktor tersebut meliputi: (1) penggunaan analogi yang tidak tepat atau menyesatkan dalam pengajaran; (2) keterbatasan dalam representasi visual dan model yang digunakan; (3) bahasa dan terminologi ilmiah yang membingungkan; (4) ketidakcukupan koneksi antara konsep makroskopik dan mikroskopik; serta (5) pengalaman sehari-hari yang bertentangan dengan konsep ilmiah (Wandersee et al., 1994). Semua faktor ini sangat relevan dengan pembelajaran materi enzim dan metabolisme.

C. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan penelitian deskriptif kualitatif dengan desain studi kasus multipel (multiple case study). Pemilihan pendekatan kualitatif didasarkan pada tujuan penelitian yang berfokus pada pemahaman mendalam tentang kompleksitas kesulitan konseptual peserta didik, yang tidak dapat sepenuhnya ditangkap melalui metode kuantitatif semata (Creswell, 2014). Namun demikian, untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang prevalensi miskonsepsi, penelitian ini juga mengintegrasikan analisis data kuantitatif deskriptif dari hasil tes diagnostik.

Subjek penelitian terdiri dari 120 peserta didik kelas XII IPA yang dipilih secara purposive sampling dari tiga Sekolah Menengah Atas di Kota Medan, Sumatera Utara. Ketiga sekolah dipilih untuk mewakili variasi dalam hal status sekolah (negeri dan swasta), tingkat akreditasi, dan latar belakang sosio-ekonomi peserta didik. Selain peserta didik, penelitian juga melibatkan 6 guru biologi yang mengajar di ketiga sekolah tersebut sebagai sumber informasi tentang pendekatan pedagogis yang digunakan.

Instrumen penelitian yang digunakan terdiri dari tiga komponen utama. Pertama, tes diagnostik two-tier multiple choice (TTMC) yang terdiri dari 40 item soal yang mencakup seluruh subkonsep enzim dan metabolisme. Setiap item terdiri dari dua tingkatan: tingkat pertama berupa pertanyaan konseptual dengan empat pilihan jawaban, dan tingkat kedua berupa pertanyaan tentang alasan pemilihan jawaban tersebut. Format TTMC dipilih karena kemampuannya dalam mengidentifikasi miskonsepsi secara lebih akurat dibandingkan tes pilihan ganda biasa (Treagust, 1988). Kedua, panduan wawancara semi-terstruktur yang

digunakan untuk menggali lebih dalam tentang pemikiran dan alasan di balik jawaban peserta didik. Wawancara dilakukan terhadap 30 peserta didik yang dipilih secara purposive berdasarkan hasil tes diagnostik. Ketiga, lembar observasi pembelajaran yang digunakan untuk mendokumentasikan proses pembelajaran di kelas.

Validitas instrumen tes diagnostik dilakukan melalui serangkaian prosedur yang ketat. Validitas konten dinilai oleh tiga orang ahli (dua ahli biologi dan satu ahli pendidikan). Uji coba instrumen dilakukan terhadap 40 peserta didik di luar sampel penelitian untuk menganalisis reliabilitas (menggunakan koefisien Cronbach's Alpha yang menghasilkan nilai 0,847), tingkat kesukaran, dan daya beda setiap item. Hasil analisis menunjukkan bahwa 38 dari 40 item memenuhi kriteria yang ditetapkan dan layak digunakan dalam penelitian.

Analisis data kualitatif dilakukan menggunakan model Miles & Huberman (1994) yang mencakup tiga tahap: reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan/verifikasi. Untuk data kuantitatif, analisis dilakukan dengan menghitung persentase peserta didik yang memberikan jawaban benar pada kedua tingkatan (dipahami dengan benar), jawaban benar-salah atau salah-benar (pemahaman parsial atau miskonsepsi), dan salah pada kedua tingkatan (tidak memahami). Klasifikasi miskonsepsi mengacu pada kriteria yang dikembangkan oleh Pesman & Eryilmaz (2010).

D. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

1. Gambaran Umum Kesulitan Konseptual

Hasil analisis terhadap tes diagnostik TTMC menunjukkan gambaran yang komprehensif tentang pola kesulitan konseptual peserta didik. Secara keseluruhan, rata-rata persentase peserta didik yang memahami konsep dengan benar hanya mencapai 31,7%, sementara 48,6% mengalami berbagai bentuk miskonsepsi, dan 19,7% tidak memahami konsep sama sekali. Angka ini mengindikasikan bahwa miskonsepsi merupakan permasalahan yang sangat prevalent dalam pembelajaran materi enzim dan metabolisme.

Dari tujuh kategori kesulitan konseptual yang teridentifikasi, kesulitan memahami rantai transpor elektron dan kemiosmosis menunjukkan persentase miskonsepsi tertinggi (72,3%), diikuti oleh kesulitan mengintegrasikan konsep enzim dengan proses metabolisme secara holistik (68,5%), dan miskonsepsi pada jalur glikolisis dan siklus Krebs (64,2%). Sementara itu, miskonsepsi tentang sifat dasar enzim sebagai biokatalis relatif lebih rendah (38,5%), meskipun angka ini masih tergolong signifikan dari perspektif pedagogis.

2. Miskonsepsi tentang Sifat dan Mekanisme Kerja Enzim

Analisis jawaban peserta didik pada subkonsep sifat dan mekanisme kerja enzim mengungkap beberapa pola miskonsepsi yang konsisten. Miskonsepsi pertama dan paling umum adalah anggapan bahwa enzim merupakan reaktan yang habis dikonsumsi setelah reaksi selesai. Sebanyak 42,5% peserta didik yang mengalami miskonsepsi pada kategori ini meyakini bahwa enzim rusak atau habis setelah bereaksi dengan substrat. Miskonsepsi ini kemungkinan besar berkembang dari analogi yang tidak tepat dengan reaktan kimia biasa, atau dari pemahaman yang tidak lengkap tentang perbedaan antara biokatalis dan reaktan (Anderson et al., 2002).

Miskonsepsi kedua berkaitan dengan spesifisitas enzim. Sebagian besar peserta didik (57,3%) memahami konsep spesifisitas enzim hanya secara superficial - mereka dapat menyebutkan bahwa setiap enzim hanya bekerja pada substrat tertentu, namun tidak dapat menjelaskan dengan benar tentang dasar struktural dari spesifisitas tersebut (komplementaritas struktur situs aktif enzim dengan substrat). Fenomena ini mencerminkan

pemahaman yang bersifat hafalan (*rote learning*) tanpa diikuti pemahaman konseptual yang mendalam (Novak & Gowin, 1984).

Model teori *induced fit* yang menjelaskan perubahan konformasi situs aktif enzim ketika berinteraksi dengan substrat merupakan subkonsep yang paling sulit dipahami. Hanya 18,3% peserta didik yang dapat menjelaskan perbedaan antara model *lock-and-key* dengan *induced fit* secara tepat. Mayoritas peserta didik (63,4%) menganggap kedua model tersebut identik atau hanya berbeda dalam nama saja, tanpa memahami perbedaan konseptual yang fundamental antara keduanya. Hasil ini sejalan dengan temuan Dikmenli (2010) yang menunjukkan tingginya prevalensi miskonsepsi tentang mekanisme kerja enzim pada berbagai jenjang pendidikan.

3. Miskonsepsi tentang Faktor-faktor yang Mempengaruhi Aktivitas Enzim

Pemahaman tentang pengaruh suhu terhadap aktivitas enzim menunjukkan pola miskonsepsi yang menarik. Meskipun sebagian besar peserta didik (71,7%) memahami bahwa terdapat suhu optimum untuk aktivitas enzim, namun pemahaman mereka tentang mekanisme di balik fenomena tersebut seringkali keliru. Sebanyak 53,3% peserta didik menjelaskan bahwa penurunan aktivitas enzim pada suhu tinggi terjadi karena enzim "mati" atau "tidak aktif lagi", tanpa memahami konsep denaturasi protein secara benar. Miskonsepsi ini menunjukkan adanya ketidakmampuan untuk menghubungkan konsep struktur protein dengan fungsinya sebagai katalis.

Pengaruh pH terhadap aktivitas enzim menghasilkan pola miskonsepsi yang serupa. Peserta didik umumnya memahami bahwa setiap enzim memiliki pH optimum, tetapi gagal menjelaskan mengapa perubahan pH dapat mempengaruhi aktivitas enzim. Lebih dari separuh peserta didik (56,7%) tidak dapat menjelaskan peran gugus ionisasi asam amino pada situs aktif enzim dalam konteks pengaruh pH. Konsep ini memang memerlukan pemahaman tentang kimia protein yang lebih dalam, yang menjadi tantangan tersendiri dalam pembelajaran biologi tingkat SMA.

Konsep inhibisi enzim, baik inhibisi kompetitif maupun non-kompetitif, merupakan subkonsep yang menunjukkan tingkat miskonsepsi tertinggi dalam kategori faktor-faktor yang mempengaruhi aktivitas enzim. Sebanyak 68,3% peserta didik tidak dapat membedakan dengan tepat antara kedua jenis inhibisi tersebut. Banyak yang menganggap bahwa inhibitor kompetitif secara permanen memblokir situs aktif enzim, tanpa memahami bahwa interaksi inhibitor kompetitif dengan situs aktif bersifat reversibel dan bergantung pada konsentrasi relatif substrat dan inhibitor.

4. Miskonsepsi pada Jalur Respirasi Seluler

Respirasi seluler sebagai proses katabolisme utama merupakan topik yang menunjukkan tingkat miskonsepsi paling tinggi dalam penelitian ini. Miskonsepsi yang paling mendasar adalah kecenderungan peserta didik untuk menyamakan respirasi seluler dengan proses pernapasan (*breathing*). Sebanyak 61,7% peserta didik menggambarkan respirasi seluler sebagai proses yang terjadi di paru-paru, bukan sebagai proses katabolisme yang terjadi di dalam sel. Miskonsepsi fundamental ini kemungkinan besar diakibatkan oleh penggunaan istilah yang sama ("*respirasi*") untuk merujuk pada dua proses yang berbeda secara biologis (Songer & Mintzes, 1994).

Pada subkonsep glikolisis, sebagian besar peserta didik (58,3%) tidak dapat menjelaskan dengan benar tahapan-tahapan yang terjadi dalam proses ini. Kesulitan utama terletak pada pemahaman tentang investasi ATP dan pengembalian ATP dalam glikolisis, serta peran koenzim NAD⁺ sebagai akseptor elektron. Banyak peserta didik yang tidak

memahami makna biologis dari konversi NAD^+ menjadi NADH , dan tidak dapat menjelaskan mengapa koenzim ini harus terus diregenerasi agar glikolisis dapat berlanjut.

Siklus Krebs (siklus asam sitrat) merupakan bagian dari respirasi seluler yang paling sulit dipahami. Hasil tes diagnostik menunjukkan bahwa hanya 22,5% peserta didik yang dapat menjelaskan tujuan utama siklus Krebs dengan benar, yaitu sebagai jalur oksidasi asetil-CoA yang menghasilkan NADH , FADH_2 , dan GTP. Mayoritas peserta didik (64,2%) menganggap siklus Krebs sebagai proses yang "menghasilkan banyak ATP", padahal produksi ATP secara langsung dalam siklus ini sangat terbatas. Miskonsepsi ini mencerminkan ketidakmampuan untuk memahami peran siklus Krebs sebagai penghasil elektron berenergi tinggi yang kemudian digunakan dalam rantai transpor elektron.

Rantai transpor elektron dan kemiosmosis merupakan subkonsep dengan tingkat miskonsepsi tertinggi dalam keseluruhan materi metabolisme (72,3%). Proses yang terjadi di membran dalam mitokondria ini melibatkan konsep-konsep fisika-kimia yang kompleks, termasuk gradien elektrokimia, transfer energi, dan mekanisme protein ATP sintase. Sebagian besar peserta didik tidak memiliki pemahaman konseptual yang memadai tentang bagaimana aliran elektron melalui kompleks protein dapat menghasilkan gradien proton yang kemudian digunakan untuk sintesis ATP. Ketidakmampuan untuk memvisualisasikan proses yang terjadi di tingkat membran molekular menjadi hambatan utama dalam pemahaman subkonsep ini.

5. Faktor-faktor Penyebab Kesulitan Konseptual

Berdasarkan analisis data wawancara dan observasi pembelajaran, teridentifikasi beberapa faktor utama yang berkontribusi pada terjadinya kesulitan konseptual. Faktor pertama adalah tingkat abstraksi materi yang sangat tinggi. Proses-proses yang terjadi pada tingkat molekular tidak dapat diamati secara langsung, sehingga peserta didik harus mengandalkan representasi mental yang dibangun dari diagram, model, dan animasi. Ketika representasi yang tersedia tidak memadai atau sulit dipahami, peserta didik cenderung membangun representasi mental yang salah atau tidak lengkap (Gilbert et al., 2004).

Faktor kedua adalah ketidakmampuan menghubungkan konsep antara berbagai tingkat organisasi biologis (tingkat molekular, seluler, dan organisme). Peserta didik seringkali mempelajari setiap topik secara terpisah tanpa memahami keterkaitan yang fundamental antara struktur enzim dengan fungsinya, antara reaksi enzimatik dengan proses metabolisme, dan antara metabolisme seluler dengan fungsi organisme secara keseluruhan. Kegagalan dalam membangun koneksi konseptual ini menyebabkan pengetahuan yang tersimpan bersifat terisolasi dan sulit diaplikasikan dalam konteks yang berbeda.

Faktor ketiga adalah dominasi strategi pembelajaran yang berorientasi pada hafalan (*rote learning*) dibandingkan pemahaman konseptual. Observasi pembelajaran menunjukkan bahwa sebagian besar waktu pembelajaran digunakan untuk menjelaskan dan menghafal tahapan-tahapan reaksi, nama-nama senyawa, dan jumlah molekul yang dihasilkan, tanpa memberikan penekanan yang memadai pada pemahaman tentang mengapa dan bagaimana proses-proses tersebut terjadi. Pendekatan ini menghasilkan pengetahuan yang dangkal dan rentan terhadap miskonsepsi (Novak, 2002).

Faktor keempat berkaitan dengan penggunaan buku teks yang tidak selalu menyajikan konsep dengan cara yang akurat dan mudah dipahami. Beberapa buku teks yang umum digunakan di sekolah-sekolah yang menjadi lokasi penelitian ditemukan mengandung penjelasan yang menyederhanakan secara berlebihan (*oversimplification*) atau bahkan keliru tentang beberapa aspek mekanisme kerja enzim dan proses metabolisme.

Ketidakkuratan dalam sumber belajar utama ini secara langsung berkontribusi pada pembentukan dan penguatan miskonsepsi peserta didik.

6. Implikasi Pedagogis

Temuan penelitian ini memiliki beberapa implikasi pedagogis yang penting. Pertama, pendidik perlu mengadopsi pendekatan pengajaran yang berorientasi pada perubahan konseptual (*conceptual change teaching*). Pendekatan ini dimulai dengan mengidentifikasi konsep awal peserta didik, menciptakan konflik kognitif melalui demonstrasi atau pertanyaan probing, dan kemudian memfasilitasi rekonstruksi konsep yang lebih tepat. Strategi ini terbukti efektif dalam mengatasi miskonsepsi yang resisten dalam berbagai konteks pembelajaran sains (Posner et al., 1982).

Kedua, penggunaan representasi multipel (*multiple representations*) yang saling melengkapi sangat direkomendasikan untuk membantu peserta didik membangun representasi mental yang akurat tentang proses-proses yang bersifat mikroskopik. Representasi multipel dapat mencakup model fisik tiga dimensi enzim dan substrat, animasi komputer yang menggambarkan dinamika molekular, diagram konsep yang menunjukkan hubungan antar konsep, dan analogi yang dipilih secara cermat untuk membantu menjelaskan konsep yang abstrak (Treagust et al., 2003).

Ketiga, pendidik perlu secara proaktif mengidentifikasi dan mengatasi miskonsepsi peserta didik melalui penggunaan tes diagnostik secara berkala. Instrumen seperti *two-tier multiple choice* yang digunakan dalam penelitian ini dapat diadaptasi untuk digunakan dalam konteks *formatif assessment*, sehingga pendidik dapat mendeteksi miskonsepsi sejak dini sebelum berkembang menjadi hambatan belajar yang lebih besar. Informasi diagnostik ini kemudian dapat digunakan untuk merancang intervensi pembelajaran yang lebih tepat sasaran.

E. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi tujuh kategori utama kesulitan konseptual yang dialami peserta didik SMA dalam mempelajari materi enzim dan reaksi metabolisme. Tingkat prevalensi miskonsepsi yang tinggi (rata-rata 48,6% dari total peserta didik) mengindikasikan bahwa permasalahan ini merupakan tantangan pedagogis yang serius dan memerlukan perhatian yang sungguh-sungguh dari para pendidik dan pengambil kebijakan pendidikan.

Miskonsepsi yang teridentifikasi dalam penelitian ini bersifat multidimensional dan saling terkait, mencerminkan kompleksitas intrinsik dari materi enzim dan metabolisme itu sendiri. Kesulitan yang paling signifikan ditemukan pada subkonsep rantai transpor elektron dan kemiosmosis (72,3%), integrasi konsep enzim-metabolisme secara holistik (68,5%), dan jalur glikolisis serta siklus Krebs (64,2%). Faktor-faktor penyebab utama meliputi tingkat abstraksi materi yang tinggi, pendekatan pembelajaran yang berorientasi hafalan, ketidakmemadaiannya representasi visual, dan ketidakkonsistenan dalam sumber belajar.

Rekomendasi utama yang dapat diajukan berdasarkan temuan penelitian ini adalah: (1) implementasi pendekatan pembelajaran berorientasi perubahan konseptual yang dimulai dengan identifikasi konsep awal peserta didik; (2) penggunaan representasi multipel yang kaya dan saling melengkapi untuk mendukung pemahaman konsep yang bersifat abstrak; (3) integrasi tes diagnostik secara berkala dalam proses pembelajaran untuk deteksi dini miskonsepsi; (4) pengembangan bahan ajar yang dirancang secara khusus untuk mengantisipasi dan mengatasi miskonsepsi yang umum terjadi; serta (5) peningkatan

kapasitas guru dalam hal pengetahuan tentang miskonsepsi peserta didik dan strategi pedagogis untuk mengatasinya.

Penelitian lebih lanjut direkomendasikan untuk mengkaji efektivitas berbagai intervensi pedagogis dalam mengatasi miskonsepsi yang teridentifikasi, serta untuk mengeksplorasi peran faktor-faktor afektif seperti motivasi dan self-efficacy dalam kaitannya dengan pembentukan dan persistensi miskonsepsi dalam pembelajaran biologi.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, C. W., Sheldon, T. H., & Dubay, J. (2002). The effects of instruction on college nonmajors' conceptions of respiration and photosynthesis. *Journal of Research in Science Teaching*, 27(8), 761-776.
- Ausubel, D. P. (1968). *Educational psychology: A cognitive view*. Holt, Rinehart and Winston.
- Berg, J. M., Tymoczko, J. L., Stryer, L., & Berg, J. M. (2015). *Biochemistry* (8th ed.). W. H. Freeman.
- Chi, M. T. H. (2008). Three types of conceptual change: Belief revision, mental model transformation, and categorical shift. In S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of research on conceptual change* (pp. 61-82). Routledge.
- Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed method approaches* (4th ed.). Sage Publications.
- Dikmenli, M. (2010). Misconceptions of cell division held by student teachers in biology: A drawing analysis. *Scientific Research and Essays*, 5(2), 235-247.
- Driver, R., Squires, A., Rushworth, P., & Wood-Robinson, V. (1994). *Making sense of secondary science: Research into children's ideas*. Routledge.
- Gilbert, J. K., Reiner, M., & Nakhleh, M. (2004). *Visualization: Theory and practice in science education*. Springer.
- Hakim, A., Liliyasi, & Kadarohman, A. (2012). Student concept understanding of natural products chemistry in primary and secondary metabolites using the data collecting technique of modified CRI. *International Online Journal of Educational Sciences*, 4(3), 544-553.
- Johnstone, A. H. (2009). You can't get there from here. *Journal of Chemical Education*, 87(1), 22-29.
- Klymkowsky, M. W., & Garvin-Doxas, K. (2008). Recognizing student misconceptions through Ed's tools and the Biology Concept Inventory. *PLoS Biology*, 6(1), e3.
- Koray, O., & Koksul, M. S. (2009). The effect of creative and critical thinking based laboratory applications on creative and logical thinking skills of prospective teachers. *Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching*, 10(1), 1-13.
- Lehninger, A. L., Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2017). *Lehninger principles of biochemistry* (7th ed.). W. H. Freeman.
- Limniou, M., & Smith, M. (2010). Teachers' and students' perspectives on teaching and learning through virtual learning environments. *European Journal of Engineering Education*, 35(6), 645-653.
- Miles, M. B., & Huberman, A. M. (1994). *Qualitative data analysis: An expanded sourcebook* (2nd ed.). Sage Publications.
- Mintzes, J. J., Wandersee, J. H., & Novak, J. D. (2001). *Assessing science understanding: A human constructivist view*. Academic Press.

- Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2017). *Lehninger principles of biochemistry* (7th ed.). W. H. Freeman.
- Novak, J. D. (2002). Meaningful learning: The essential factor for conceptual change in limited or appropriate propositional hierarchies leading to empowerment of learners. *Science Education*, 86(4), 548-571.
- Novak, J. D., & Gowin, D. B. (1984). *Learning how to learn*. Cambridge University Press.
- Pesman, H., & Eryilmaz, A. (2010). Development of a three-tier test to assess misconceptions about simple electric circuits. *The Journal of Educational Research*, 103(3), 208-222.
- Piaget, J. (1972). *The psychology of the child*. Basic Books.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211-227.
- Sadler, P. M., & Sonnert, G. (2016). Understanding misconceptions: Teaching and learning in middle school physical science. *American Educator*, 40(1), 26-32.
- Sanger, M. J., & Greenbowe, T. J. (1999). An analysis of college chemistry textbooks as sources of misconceptions and errors in electrochemistry. *Journal of Chemical Education*, 76(6), 853.
- Slater, S. J., Slater, T. F., & Olsen, J. K. (2008). Survey of science education research published in 2007. *Journal of Science Education Research*, 12(2), 117-129.
- Songer, C. J., & Mintzes, J. J. (1994). Understanding cellular respiration: An analysis of conceptual change in college biology. *Journal of Research in Science Teaching*, 31(6), 621-637.
- Tekkaya, C. (2002). Misconceptions as barrier to understanding biology. *Journal of Hacettepe University Education Faculty*, 23, 259-266.
- Treagust, D. F. (1988). Development and use of diagnostic tests to evaluate students' misconceptions in science. *International Journal of Science Education*, 10(2), 159-169.
- Treagust, D. F., Chittleborough, G., & Mamiala, T. (2003). The role of submicroscopic and symbolic representations in chemical explanations. *International Journal of Science Education*, 25(11), 1353-1368.
- Vosniadou, S. (2013). *International handbook of research on conceptual change* (2nd ed.). Routledge.
- Wandersee, J. H., Mintzes, J. J., & Novak, J. D. (1994). Research on alternative conceptions in science. In D. L. Gabel (Ed.), *Handbook of research on science teaching and learning* (pp. 177-210). Macmillan.
- Yip, D. Y. (1998). Identification of misconceptions in novice biology teachers and remedial strategies for improving biology learning. *International Journal of Science Education*, 20(4), 461-477.